

响应面法优化脉冲电场处理油菜籽的工艺及品质评价

周 婷^{1#}, 邹婷婷^{1#}, 李 倩^{1*}, 祁兴普², 蔡铭杰¹, 李永莲¹, 朱麟菲¹

(1. 扬州大学食品科学与工程学院, 扬州 225127; 2. 江苏农牧科技职业学院食品科技学院, 泰州 225300)

摘 要: **目的** 探究脉冲电场(pulsed electric field, PEF)处理油菜籽的提取工艺、理化性质和品质评价。**方法** 采用 PEF 预处理油菜籽, 通过单因素实验考察脉冲电压、停留时间、脉冲频率和脉冲宽度 4 个因素对菜籽油出油率的影响, 并通过响应面法优化其提取工艺; 通过扫描电镜、红外光谱、紫外光谱和国家标准方法测定 PEF 处理菜籽油的理化性质; 通过气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)测定 PEF 处理菜籽油的脂肪酸组成。**结果** PEF 处理菜籽油的最佳提取工艺为: 脉冲电压 35 kV、停留时间 184 s、脉冲频率 810 Hz、脉冲宽度 8 μ s, 在此条件下油菜籽出油率为 93.25% $\pm$ 0.19%; PEF 处理能够破坏油菜籽的细胞结构, 增加其出油率; 经 PEF 处理的菜籽油具有一般植物油的特征结构; 与压榨法相比, PEF 处理降低了菜籽油的酸价, 减缓了菜籽油的氧化程度, 其他品质指标符合国家标准中一般菜籽油的质量要求; PEF 处理增加了亚油酸、亚麻酸和棕榈酸的含量, 降低了油酸的含量。**结论** 最佳提取条件下, PEF 处理菜籽油的出油率可达 93.25%, 经 PEF 处理的菜籽油具有更优的油脂品质。PEF 协同冷榨法提取是一种菜籽油的高效提取方法。

关键词: 脉冲电场; 油菜籽; 出油率; 理化性质; 脂肪酸; 油脂品质

Optimization of process of *Brassica napus* L. treated by pulsed electric field using response surface methodology and oil quality evaluation

ZHOU Ting^{1#}, ZOU Ting-Ting^{1#}, LI Qian^{1*}, QI Xing-Pu², CAI Ming-Jie¹,
LI Yong-Lian¹, ZHU Lin-Fei¹

(1. School of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Jiangsu Agri-animal Husbandry Vocational College, College of Food Science and Technology, Taizhou 225300, China)

ABSTRACT: Objective To explore the extraction process, physicochemical properties and quality evaluation of *Brassica napus* L. treated by pulsed electric field (PEF). **Methods** The single factor experiment was used to investigate the effects of 4 factors including pulse voltage, residence time, pulse frequency and pulse width on the oil yield of PEF-treated *Brassica napus* L. oil, and the extraction process was optimized by response surface

基金项目: 国家自然科学基金项目(32072133)、扬州大学大学生创新训练计划项目(X20200897、X20190917)、江苏农牧科技职业学院校级科研项目(NSF2021ZR07)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32072133), the Undergraduate Science & Technology Innovation Foundation of Yangzhou University (X20200897, X20190917), and the Research Foundation of Jiangsu Agri-animal Husbandry Vocational College (NSF2021ZR07)

#周 婷、邹婷婷为共同第一作者

#ZHOU Ting and ZOU Ting-Ting are Co-first Authors

*通信作者: 李 倩, 博士, 讲师, 主要研究方向为粮油食品加工与应用。E-mail: liqian0101@yzu.edu.cn

*Corresponding author: LI Qian, Ph.D, Lecturer, Yangzhou University, Huayang Xilu 196, Yangzhou 225127, China. E-mail: liqian0101@yzu.edu.cn

methodology, the physicochemical properties of PEF-treated *Brassica napus* L. oil were determined by scanning electron microscopy, infrared spectroscopy, ultraviolet spectroscopy and the national standard methods, and the fatty acid composition was determined by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). **Results** The optimal parameters of PEF treatment were obtained as follows: Pulse voltage 35 kV, residence time 184 s, pulse frequency 810 Hz and pulse width 8 μ s, under these conditions, the oil yield was 93.25% $\pm$ 0.19%; PEF treatment could destroy the cell structure and increase its oil yield. The PEF-treated *Brassica napus* oil had the characteristic structure of general vegetable oil. Compared with traditional pressing method, PEF treatment could reduce the acid value and slow down the oxidation degree of *Brassica napus* oil, and other quality indicators could meet the quality requirements of general rapeseed oil in the national standard. PEF treatment could increase the content of linoleic acid, linolenic acid and palmitic acid of *Brassica napus* oil, and reduce the content of oleic acid. **Conclusion** Under the optimal extraction conditions, the oil yield of PEF-treated *Brassica napus* oil can reach 93.25%, and this *Brassica napus* oil has better oil quality. PEF combined with cold pressing extraction is an efficient method for the extraction of *Brassica napus* oil.

KEY WORDS: pulsed electric field; *Brassica napus* L.; oil yield; physicochemical properties; fatty acid; oil quality

0 引言

油菜籽(*Brassica napus* L.)别名芸苔子,是我国种植面积最大的油料作物,占我国油料作物产油量的 50%以上。目前,国内食用油产量已连续 3 年恢复性上升,但仍有 60%以上产量依赖进口,供需缺口依然较大^[1]。菜籽油富含油酸、酚类、维生素 E 和植物甾醇等多种营养成分,具有预防人体动脉粥样硬化和抗衰老等多种生理功能^[2]。因此,采用合理技术手段对菜籽油进行高效高品质加工尤为重要。传统浸出法虽然出油率高,但是存在毛油质量差、有毒溶剂残留、提取时间长且能耗大等问题^[3-4]。压榨法分为热榨和冷榨,其中热榨油品质色泽深且酸值和过氧化值较高,易产生焦糊味^[5]。冷榨油品质色泽浅,无需精炼即可食用,对油料的理化品质影响较小,但饼粕残油量较大^[6]。

脉冲电场(pulsed electric field, PEF)是一种绿色新型的非热加工技术,能耗低、污染小,已逐渐应用于植物油的提取加工^[7]。周亚军等^[8]利用 PEF 协同酶法辅助提取玫瑰精油,出油率比蒸馏法和酶辅助蒸馏法分别提高了 43.83%和 20.48%,总耗时分别节省了 25%和 40%;王丽娟等^[9]利用 PEF 辅助浸出法提取双低油菜籽油,出油率提高了 23.61%。相比于传统提取法,PEF 辅助提取能够明显提高菜籽油的出油率。然而,利用 PEF 协同冷榨法提取菜籽油的研究报道较少,该方法对菜籽油理化性质及品质的影响尚不清楚。因此本研究拟采用 PEF 预处理油菜籽,经冷榨法提取菜籽油,并通过响应面法优化其提取工艺,同时探究 PEF 处理对菜籽油品质的影响,以期为我国菜籽油的高效高品质加工与应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

油菜籽:秦油 2 号,产于江苏南通。

异辛烷、*P*-茴香胺、硫代硫酸钠、三羟甲基氨基甲烷(Tris)、丁基羟基茴香醚(butyl hydroxy anisole, BHA)、过硫酸钾、三氯乙酸、无水乙醇、异丙醇、碘化钾、2,4-二硝基苯酚、邻苯三酚、乙醚、三氯甲烷(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

HD35-5 高压脉冲电源(天津市惠达电子元件厂);ZYJ9028 榨油机(江门市贝尔斯顿有限公司);SZF-06 粗脂肪测定仪(上海新嘉电子有限公司);Gemini SEM 300 场发射扫描电镜(德国 Carl Zeiss 公司);759S 紫外可见分光光度计(上海棱光技术有限公司);670-IR+610-IR 显微红外光谱仪(美国 Varian 公司);Trace DSQ II 气相色谱-质谱联用仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 油菜籽主要成分测定

蛋白质测定参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法;脂肪测定参照 GB/T 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》索氏抽提法;水分测定参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》直接干燥法;硫代葡萄糖苷测定参考文献[10]中的硫酸根离子沉淀法。

1.3.2 经 PEF 处理的油菜籽结构

将油菜籽置于扫描电子显微镜下以 5 kV 电子束进行观察,扫描油菜籽颗粒断裂的横截面,采集细胞结构图像,分析油菜籽结构变化。

1.3.3 油菜籽预处理

将 50 g 油菜籽放入双蒸水中浸泡,控制各组含水量为 10、20、30、40、50、60 g/100 g,晾干表面水分后将油菜籽均匀平铺在电场处理腔内,进行脉冲电场处理。将处理后的油菜籽放入 40 $^{\circ}$ C 烘箱干燥,用榨油机压榨制油,得

到菜籽油并称重。按式(1)计算出油率。

$$\text{出油率}/\% = \frac{\text{榨出油的质量}}{\text{油菜籽中粗脂肪的质量}} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.4 单因素实验

以油菜籽出油率为评价指标, 设置极板间距为 45 mm、脉冲电压为 30 kV、物料停留时间为 120 s、脉冲频率为 600 Hz、脉冲宽度为 8 μs。分别考察脉冲电压(10、15、20、25、30、35 kV), 物料停留时间(60、90、120、150、180、210 s), 脉冲频率(100、200、400、600、800、1000 Hz)和脉冲宽度(2、4、6、8、10 μs)对菜籽油出油率的影响。

1.3.5 响应面优化实验

以单因素实验结果为参考, 选取脉冲电压、物料停留时间、脉冲频率和脉冲宽度 4 个自变量, 设计四因素三水平实验, 进一步优化 PEF 处理菜籽油的生产工艺^[11]。

1.3.6 红外光谱分析

直接吸取油样置于 Ge 晶体样品槽, 采用傅立叶红外光谱仪, 于 4000~400 cm⁻¹ 波段处扫描, 获得红外光谱图。

1.3.7 紫外光谱分析

参照 GB/T 22500—2008《动植物油脂 紫外吸光度的测定》, 将油样配制成 1 g/100 mL 异辛烷溶液, 于 190~400 nm 波段处扫描, 记录其在 232 和 268 nm 波长处的吸光度 $E_{232\text{ nm}}$ 和 $E_{268\text{ nm}}$ 。

1.3.8 理化性质分析

酸价测定参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》冷溶剂指示剂滴定法; 过氧化值测定参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》滴定法; *P*-茴香胺值测定参照 GB/T 24304—2009《动植物油脂 茴香胺值的测定》; 碘值测定参照 GB/T 5532—2008《动植物油脂 碘值的测定》; 皂化值测定参考 GB/T 5534—2008《动植物油脂 皂化值的测定》; 硫代巴比妥酸值测定参照 GB/T 35252—2017《动植物油脂 2-硫代巴比妥酸值的测定 直接法》; 羰基价测定参照 GB/T

5009.230—2016《食品安全国家标准 食品中羰基价的测定》。

1.3.9 脂肪酸组成分析

气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)条件: DB-WAX 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度 220 °C; 载气为氦气, 流速 0.9 mL/min; 分流比 10:1; 进样量 1.0 μL; 检测器温度 250 °C。甲酯化参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》测定油样脂肪酸含量。

1.3.10 数据处理

采用 Origin 8.0 进行数据分析和绘图, 采用 Design-Expert 8.0.6 进行响应面优化实验。采用 SPSS 23.0 进行差异分析($P<0.05$, 差异显著)。

2 结果与分析

2.1 油菜籽的主要成分

本研究对秦油 2 号油菜籽中主要成分的含量进行了测定, 结果见表 1。由表 1 可知, 该品种油菜籽中的粗脂肪含量高达 36.40 g/100 g, 是提取菜籽油的理想油料。

表 1 油菜籽中主要成分的含量($n=3$)

Table 1 Content of main components in *Brassica napus* L. ($n=3$)

成分	粗蛋白 /(g/100 g)	粗脂肪 /(g/100 g)	水分 /(g/100 g)	硫苷 /(μmol/g)
含量	17.66±0.71	36.40±1.59	8.28±0.43	110.80±6.94

2.2 PEF 处理对油菜籽结构的影响

由图 1 可知, 未经 PEF 处理的油菜籽颗粒断裂的横截面细胞结构较完整, 无明显破损; 而经 PEF 处理的油菜籽细胞明显破裂, 出现缝隙、孔状等。这是因为通过电穿孔作用破坏了流经两个电极间的细胞结构^[8], 细胞通透性增加, 使细胞内容物更易溶出, 能够增加油菜籽的出油率。

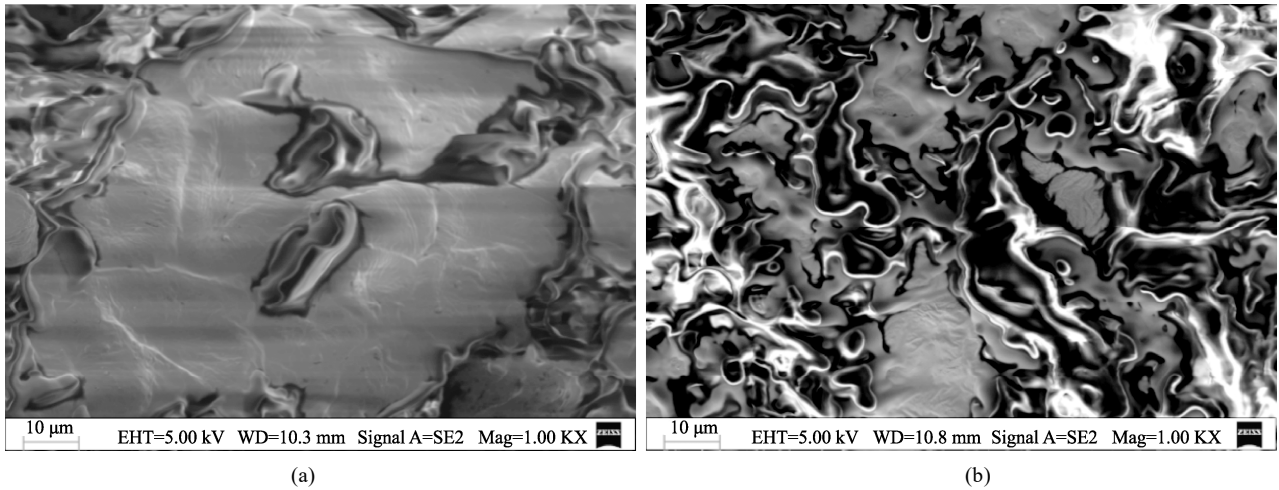


图 1 未处理油菜籽(a)和经 PEF 处理油菜籽(b)的扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron microscope images of untreated *Brassica napus* L. (a) and PEF-treated *Brassica napus* L. (b)

2.3 预调水分对出油率的影响

本研究探究了含水量对油菜籽出油率的影响, 结果表明, 油菜籽的出油率随含水量的增加先上升后下降。这是因为提高水分会增强油菜籽的导电性, 加深细胞膜的破裂程度, 使油脂更易溶出^[12]。在含水量为 50 g/100 g 时, 油菜籽的出油率达到最高, 为 77.68%。在含水量为 60 g/100 g 时, 出油率反而降低了, 原因可能是随着含水量的持续升高, PEF 破坏了膜内的油脂结构, 导致出油率降低。因此, 选择适宜的含水量为 50 g/100 g。

2.4 单因素实验

通过单因素实验考察了脉冲电压、停留时间、脉冲频率和脉冲宽度 4 个因素对油菜籽出油率的影响。结果表明, 当脉冲电压在 10~30 kV 范围内, 随着电场强度的增大出油率明显提高, 当电场强度达到 30 kV 时, 油菜籽的出油率达到最高, 超过 30 kV 后出油率提高的趋势变缓。这是因为电压增大使电场作用更剧烈, 破坏了细胞膜结构, 使油脂更易溶出, 待细胞内容物已基本溶出后, 油菜籽的出油率变化趋势不明显^[13]。因此, 选择适宜的脉冲电压为 30 kV。

当油菜籽处理时间在 60~180 s 范围内, 随着时间的延长出油率明显提高, 超过 180 s 后, 油菜籽的出油率有小幅降低。这是因为油菜籽在脉冲电场腔内停留时间越长, 细胞膜被破坏程度越大, 胞内外物质交换越频繁, 提高了出油率。但当停留时间达到一定数值, 细胞膜通透性不再增加, 而膜内油脂颗粒遭到较大破坏^[12], 导致收集油脂的损失, 出油率降低。因此, 选择适宜的停留时间为 180 s。

当脉冲频率小于 800 Hz 时, 随着脉冲频率的升高出油率明显提高。这是因为脉冲频率跟脉冲次数成正相关, 频率越高次数越多, 细胞膜破坏程度也越大, 油脂溶出就越多。当频率大于 800 Hz 后, 出油率略有降低, 这是由于此频率下细胞膜的通透性不再增加, 但膜内的其他杂质竞争性溶出^[14], 降低了出油率。因此, 选择适宜的脉冲频率为 800 Hz。

当脉冲宽度小于 8 μs 时, 随着脉冲宽度的增加出油率明显提高, 超过 8 μs 后, 出油率明显下降。这是因为脉冲宽度直接影响了脉冲电场提取所得物质的量^[15], 与王丽娟等^[9]的研究结果趋势相似。因此, 选择适宜的脉冲宽度为 8 μs。

2.5 响应面优化实验

依据单因素实验结果, 以脉冲电压(A)、停留时间(B)、脉冲频率(C)、脉冲宽度(D)为实验因素, 出油率(Y)为响应值, 基于 Box-Behnken 设计四因素三水平的优化实验, 结果见表 2。采用 Design-Expert 软件进行响应面回归分析, 得到多元二次回归方程: $Y=91.37+2.86A+0.71B+0.19C+0.24D-0.47AB-0.51AD-0.79BC-0.21BD-0.40CD-0.83A^2-0.72B^2-0.61C^2-1.22D^2$ 。为检验方程的可靠性, 确定各因素对油菜

籽出油率的影响程度, 对回归方程进行了显著性检验及方差分析。结果表明, 失拟项检验 $F=5.73, P=0.0563>0.05$, 不显著, 表明该模型拟合适当。模型相关系数 $R^2=0.9993$, 说明该模型能解释 99.93% 的异变情况^[16-17], 模型可靠。信噪比为 45.404 远大于 4, 对模型有利, 进一步说明模型拟合较好。综上, 该模型可以用来优化 PEF 处理油菜籽的提取工艺。脉冲电压、停留时间、脉冲频率和脉冲宽度的一次项和二次项, 脉冲电压和停留时间, 脉冲电压和宽度, 停留时间和频率, 脉冲频率和宽度的交互作用显著。

根据响应面模型, 得到最佳 PEF 处理条件为: 脉冲电压 35 kV、物料停留时间 183.93 s、脉冲频率 810.20 Hz、脉冲宽度 7.86 μs。在此条件下, 油菜籽出油率的理论值为 93.43%。考虑到实际操作及可行性, 将最佳工艺参数调整为: 脉冲电压 35 kV、物料停留时间 184 s、脉冲频率 810 Hz、脉冲宽度 8 μs, 在此条件下, 油菜籽出油率为 93.25%±0.19%, 与预测值接近, 表明本模型可靠准确、优化条件切实可行。

表 2 响应面实验设计与结果
Table 2 Response surface experimental design and results

序号	A 脉冲 电压/kV	B 停留 时间/s	C 脉冲 频率/Hz	D 脉冲 宽度/μs	出油率 /%
1	0 (30)	0 (180)	0 (800)	0 (8)	91.40
2	0	0	0	0	91.31
3	1 (35)	0	1 (900)	0	92.74
4	1	-1 (150)	0	0	92.32
5	1	0	0	-1 (7)	92.60
6	0	-1	0	-1	88.21
7	0	0	0	0	91.37
8	0	0	1	-1	90.20
9	0	1 (210)	0	-1	90.05
10	0	1	0	1 (9)	90.11
11	-1 (25)	0	0	-1	85.60
12	1	0	-1 (700)	0	92.66
13	0	-1	1	0	90.24
14	0	0	-1	-1	88.46
15	0	0	-1	1	89.67
16	0	0	1	1	89.80
17	-1	1	0	0	88.23
18	0	1	1	0	90.07
19	0	0	0	0	91.34
20	0	1	-1	0	91.57

表 2(续)					
序号	A 脉冲 电压/kV	B 停留 时间/s	C 脉冲 频率/Hz	D 脉冲 宽度/ μ s	出油率 /%
21	-1	0	1	0	87.09
22	1	1	0	0	92.78
23	0	-1	-1	0	88.58
24	0	-1	0	1	89.10
25	0	0	0	0	91.42
26	-1	0	0	1	87.21
27	-1	-1	0	0	85.90
28	1	0	0	1	92.15
29	-1	0	-1	0	86.94

2.6 红外光谱

菜籽油中含有丰富的油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸,其主要基团为甲基、亚甲基和酯基等^[18-19]。由图 2 可知,3007 cm⁻¹处为不饱和碳原子=C-H 上的振动;-CH₂在 2922 cm⁻¹处有不对称伸缩振动峰,在 2853 cm⁻¹处有对称伸缩振动峰,在 1461 cm⁻¹处有剪式振动峰,在 1237 cm⁻¹处有面外弯曲振动峰,在 721 cm⁻¹处有平面摇摆振动峰;酯基中 C=O 在 1743 cm⁻¹处有强烈的吸收带;-CH₃对称变角振动在 1376 cm⁻¹处;C-O-C 的伸缩振动在 1160 cm⁻¹处,这些均为植物油的特征结构信息^[20-22]。

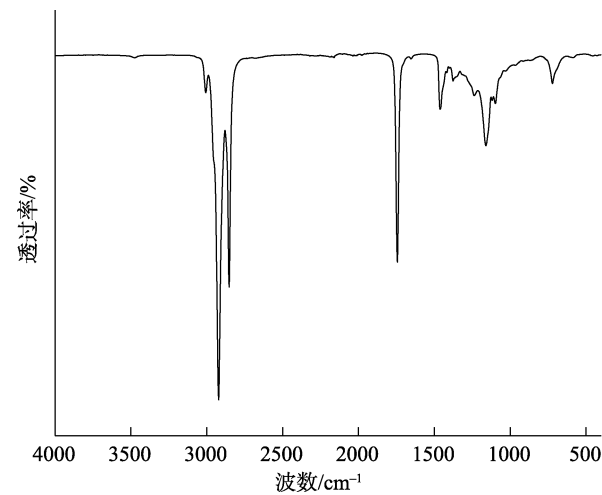


图 2 经 PEF 处理的菜籽油红外光谱图
Fig.2 Infrared spectrum of PEF-treated *Brassica napus* L. oil

2.7 紫外光谱

菜籽油脂肪酸组成中的共轭分子在 K 吸收带有特征吸收,在 232 和 268 nm 附近有共轭二烯和共轭三烯的紫外

吸收峰^[23]。结果表明,PEF 处理菜籽油的共轭二烯吸光度($E_{232\text{ nm}}$)为 1.61 ± 0.03 ,共轭三烯吸光度($E_{268\text{ nm}}$)为 0.62 ± 0.02 。这与余盖文等^[1]研究压榨菜籽油的紫外吸收结果接近,表明 PEF 处理对菜籽油的二元和三元共轭结构影响较小。

2.8 菜籽油的理化指标

由表 3 可知,经 PEF 处理的菜籽油酸价为 1.54 mg KOH/g,低于压榨菜籽油的酸价^[5],可能是由于电场处理影响了甘油三酯的水解过程,且该菜籽油没有经过后续精炼,结果符合国家 4 级菜籽油标准。经 PEF 处理的菜籽油过氧化值为 3.46 mmol/kg,与压榨菜籽油的过氧化值接近^[24-25],达到国家 1 级菜籽油标准。其碘值、皂化值和羰基价均符合国家标准中一般菜籽油的质量要求。*p*-茴香胺和硫代巴比妥酸值与压榨菜籽油接近^[26-27]。综上,PEF 处理能够在一定程度上减缓菜籽油的氧化程度,有效保持菜籽油的品质。

表 3 经 PEF 处理的菜籽油理化指标($n=3$)		
Table 3 Physicochemical indicators of PEF-treated <i>Brassica napus</i> L. oil ($n=3$)		
理化指标	国家标准 ^a	菜籽油
酸价/(mg KOH/g)	≤ 4.0	1.54 ± 0.05
过氧化值/(mmol/kg)	≤ 7.5	3.46 ± 0.14
<i>p</i> -茴香胺/(meq/kg)	-	1.12 ± 0.03
碘值/(g/kg)	940~1200	884.80 ± 7.10
皂化值/[mg/(KOH g)]	168~181	172.09 ± 0.18
硫代巴比妥酸值/(meq/kg)	-	0.41 ± 0.06
羰基价/(meq/kg)	≤ 50	11.54 ± 0.43
总氧化值/(meq/kg)	-	8.12 ± 0.37

注: ^aGB/T 1536—2004《菜籽油》;-表示无。

2.9 菜籽油的脂肪酸组成

经 PEF 处理的菜籽油脂肪酸组成见表 4。结果表明,油酸(C18:1)是该菜籽油中含量最高的脂肪酸,占总脂肪含量的 35.77%,属于单不饱和脂肪酸。亚油酸(C18:2)和亚麻酸(C18:3)的含量相对较少,分别占 19.89%和 16.85%,属于多不饱和脂肪酸。棕榈酸(C16:0)是该菜籽油中主要的饱和脂肪酸,占 17.17%。花生酸(C20:0)、山嵛酸(C22:0)、木焦油酸(C24:0)和肉豆蔻酸(C14:0)等其他饱和脂肪酸含量很少,总量占 4.07%。芥酸(C22:1)含量为 0.63%,花生二烯酸(C20:2)含量为 0.04%,符合我国低芥酸菜籽油的标准(芥酸 ND~3.0%,花生二烯酸 ND~1.0%)。与压榨菜籽油^[28-30]相比,PEF 处理增加了亚油酸、亚麻酸和棕榈酸的含量,降低了油酸的含量,一定程度上影响了菜籽油的营养品质。

表 4 经 PEF 处理的菜籽油脂肪酸组成的含量(n=3)
Table 4 Content of fatty acid composition of PEF-treated *Brassica napus* L. oil (n=3)

脂肪酸组成	化学名称	相对含量/%
C14:0	肉豆蔻酸	0.24±0.01
C16:0	棕榈酸	17.17±0.11
C16:1	棕榈油酸	0.31±0.03
C16:2	十六碳二烯酸	0.12±0.01
C16:3	十六碳三烯酸	0.23±0.02
C18:0	硬脂酸	0.01±0.001
C18:1	油酸	35.77±2.14
C18:2	亚油酸	19.89±1.73
C18:3	亚麻酸	16.85±1.06
C20:0	花生酸	2.21±0.17
C20:1	花生一烯酸	2.27±0.10
C20:2	花生二烯酸	0.04±0.02
C22:0	山嵛酸	1.10±0.08
C22:1	芥酸	0.63±0.04
C24:0	木焦油酸	0.51±0.07
C24:1	二十四碳一烯酸	0.30±0.05

3 结论与讨论

本研究以秦油 2 号油菜籽为原料, 经脉冲电场预处理后, 通过响应面法优化菜籽油的最佳提取工艺。结果表明, 最优条件为: 脉冲电压 35 kV、物料停留时间 184 s、脉冲频率 810 Hz、脉冲宽度 8 μs, 在此条件下, 油菜籽出油率为 93.25%±0.19%。与传统压榨法^[9]相比, 出油率提高了 48.06%, 是一种高效的菜籽油提取方法。

通过 SEM 观察油菜籽的分子形貌, 发现 PEF 处理能够更大程度地破坏其细胞结构, 增强细胞通透性, 增加出油率。由红外光谱可知, 经 PEF 处理的菜籽油具有一般植物油的特征结构。PEF 处理对菜籽油的二元和三元共轭结构影响较小。与压榨法相比, PEF 处理能够降低菜籽油的酸价, 一定程度上减缓了菜籽油的氧化程度, 其他品质指标与压榨菜籽油接近, 均符合国家标准中一般菜籽油的质量要求。PEF 处理增加了菜籽油中亚油酸、亚麻酸和棕榈酸的含量, 降低了油酸的含量, 一定程度上影响了菜籽油的营养品质。综上, PEF 协同冷榨法提取的油菜籽出油率高达 93.25%, 且油脂的品质优异, 该方法是菜籽油高效高品质提取的理想手段。

参考文献

[1] 余盖文, 刘晔, 王明明, 等. 菜籽油精炼热处理对紫外光谱的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(6): 45–50.

YU GW, LIU Y, WANG MM, *et al.* Influence of heat treatment on the ultraviolet spectra of rapeseed oil [J]. *J China Cere Oils Ass*, 2018, 33(6): 45–50.

[2] SIGER A, MICHALAK M, RUDZINSKA M. Canolol, tocopherols, plastochromanol-8, and phytosterols content in residual oil extracted from rapeseed expeller cake obtained from roasted seed [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2016, 118(9): 1358–1367.

[3] 任燕勤. 乙醇水提法提取菜籽油的工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.

REN YQ. Research on the extraction process of rapeseed oil by ethanol extraction [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.

[4] ZHANG Y, WU Y, CHEN S, *et al.* Flavor of rapeseed oil: An overview of odorants, analytical techniques, and impact of treatment [J]. *Comp Rev Food Sci Food*, 2021, 20(4): 3983–4018.

[5] 张友峰. 木榨菜籽油品质与安全控制技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.

ZHANG YF. Research on quality and safety control technology of wood-pressed rapeseed oil [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.

[6] 张亮. 不同加工工艺的菜籽油品质及其生物学评价[D]. 无锡: 江南大学, 2016.

ZHANG L. Quality and biological evaluation of rapeseed oil treated by different processing techniques [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.

[7] HONG J, CHEN R, ZENG XA, *et al.* Effect of pulsed electric fields assisted acetylation on morphological, structural and functional characteristics of potato starch [J]. *Food Chem*, 2016, 192: 15–24.

[8] 周亚军, 李圣桡, 王淑杰, 等. 高压脉冲电场协同酶法辅助提取玫瑰精油工艺优化[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 270–277.

ZHOU YJ, LI SR, WANG SJ, *et al.* Optimization of high-voltage pulsed electric field synergistic enzymatic-assisted extraction of rose essential oil [J]. *Food Sci*, 2020, 41(6): 270–277.

[9] 王丽娟, 钱建亚. 脉冲电场处理双低油菜籽提高出油率及对主要脂肪酸的影响[J]. 中国油脂, 2016, 41(10): 6–10.

WANG LJ, QIAN JY. Pulsed electric field treatment of canola improves oil yield and its effect on major fatty acids [J]. *China Oils Fats*, 2016, 41(10): 6–10.

[10] 褚庆华, 倪听路. 油菜籽及其饼粕中硫代葡萄糖苷总量快速测定方法的研究[J]. 中国粮油学报, 2004, 19(1): 79–81.

CHU QH, NI TL. Study on the rapid determination method of total glucosinolate in rapeseed and its meal [J]. *J China Cere Oils Ass*, 2004, 19(1): 79–81.

[11] SHIEKH KA, OLATUNDE OO, ZHANG B, *et al.* Pulsed electric field assisted process for extraction of bioactive compounds from custard apple (*Annona squamosa*) leaves [J]. *Food Chem*, 2021, 359: 129976.

[12] 孙丽霞, 杨红, 张丽芳, 等. 响应面法优化高压脉冲电场辅助提取海鲫鱼内脏油脂工艺[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 232–237.

SUN LX, YANG H, ZHANG LF, *et al.* Optimization of high-voltage pulsed electric field-assisted extraction of visceral oils from sea carp by response surface methodology [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(16): 232–237.

[13] 代名君, 尤丽新, 文连奎, 等. 高压脉冲电场辅助提取葛花黄酮工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(23): 94–98.

DAI MJ, YOU LX, WEN LK, *et al.* Optimization of high-voltage pulsed electric field-assisted extraction of flavonoids from kudzu [J]. *Food Res*

- Dev, 2016, 37(23): 94–98.
- [14] 李思伦, 曾新安, 牛德宝, 等. 响应面优化脉冲电场辅助提取沙田柚果皮中柚皮苷的工艺[J]. 食品科技, 2020, 45(6): 261–266.
- LI SL, ZENG XAN, NIU DB, *et al.* Response surface optimization of pulsed electric field-assisted extraction of naringin from Shatian pomelo peel [J]. Food Sci Technol, 2020, 45(6): 261–266.
- [15] 鲍妮娜. 高压脉冲电场辅助溶剂提取鹿茸渣中卵磷脂[J]. 天然产物研究与开发, 2016, 28(12): 1983–1988.
- BAO NN. High-voltage pulsed electric field-assisted solvent extraction of lecithin from deer antler residue [J]. Nat Prod Res Dev, 2016, 28(12): 1983–1988.
- [16] ARSHAD RN, ABDUL-MALEK Z, ROOBAB U, *et al.* Effective valorization of food wastes and by-products through pulsed electric field: A systematic review [J]. J Food Process Eng, 2021, 44(3): e13629.
- [17] 骆航, 王文渊, 尹素娟, 等. 响应面法优化高压脉冲电场提取火棘果活性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(2): 373–380.
- LUO H, WANG WY, YIN SJ, *et al.* Optimization of high-voltage pulsed electric field extraction of active components from pyracantha fruit by response surface methodology [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(2): 373–380.
- [18] 范璐, 王美美, 杨红卫, 等. 傅里叶变换红外吸收光谱识别五种植物油的研究[J]. 分析化学, 2007, (3): 390–392.
- FAN L, WANG MM, YANG HW, *et al.* Identification of five vegetable oils by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Anal Chem, 2007, (3): 390–392.
- [19] MAO X, CHEN W, HUYAN Z, *et al.* Impact of linolenic acid on oxidative stability of rapeseed oils [J]. J Food Sci Technol, 2020, 57(9): 3184–3192.
- [20] 丁进锋, 赵凤敏, 李少萍, 等. 亚麻籽油红外光谱分析及体外抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2016, 41(9): 254–257.
- JING JF, ZHAO FM, LI SP, *et al.* Infrared spectroscopy analysis and *in vitro* antioxidant activity of flaxseed oil [J]. Food Sci Technol, 2016, 41(9): 254–257.
- [21] CHEW SC. Cold-pressed rapeseed (*Brassica napus*) oil: Chemistry and functionality [J]. Food Res Int, 2020, 131: 108997.
- [22] DU QW, ZHU MT, SHI T, *et al.* Adulteration detection of corn oil, rapeseed oil and sunflower oil in camellia oil by in situ diffuse reflectance near-infrared spectroscopy and chemometrics [J]. Food Control, 2021, 121: 107577.
- [23] 胡伟, 李湘洲, 王郝为, 等. 茶油氧化过程中紫外吸收光谱特性[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(5): 92–95.
- HU W, LI XZ, WANG HW, *et al.* Characteristics of ultraviolet absorption spectra during tea oil oxidation [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2016, 31(5): 92–95.
- [24] 程江华, 王灼琛, 谢宁宁, 等. 传统作坊式压榨菜籽油理化指标和脂肪酸分析[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(10): 40–43.
- CHENG JH, WANG ZC, XIE NN, *et al.* Physical and chemical indicators and fatty acid analysis of traditional workshop-pressed rapeseed oil [J]. J Cere Oils, 2017, 30(10): 40–43.
- [25] YU P, YANG Y, SUN J, *et al.* Identification of volatile sulfur-containing compounds and the precursor of dimethyl sulfide in cold-pressed rapeseed oil by GC-SCD and UPLC-MS/MS [J]. Food Chem, 2022, 367: 130741.
- [26] 王若琼. 烘烤预处理油菜籽的储藏方式对压榨菜籽油品质的影响研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(6): 25–29, 44.
- WANG RQ. Effects of storage methods of roasted rapeseed on the quality of pressed rapeseed oil [J]. China Oils Fats, 2020, 45(6): 25–29, 44.
- [27] WANG W, YANG B, LI W, *et al.* Effects of steam explosion pretreatment on the bioactive components and characteristics of rapeseed and rapeseed products [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 143: 111172.
- [28] 胡卫强, 宋军, 刘忠义. 利用 GC/MS 分析草鱼内脏鱼油和菜籽油的脂肪酸组成[J]. 食品与机械, 2011, 27(5): 48–51.
- HU WQ, SONG J, LIU ZY. Analysis of fatty acid composition of grass carp visceral fish oil and rapeseed oil by GC/MS [J]. Food Mach, 2011, 27(5): 48–51.
- [29] COUGHLAN R, MOANE S, LARKIN T. Variability of essential and nonessential fatty acids of irish rapeseed oils as an indicator of nutritional quality [J]. Int J Food Sci, 2022, 10: 14.
- [30] KAUR H, WANG L, STAWNIAK N, *et al.* The impact of reducing fatty acid desaturation on the composition and thermal stability of rapeseed oil [J]. Plant Biotechnol J, 2020, 18(4): 983–991.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



周 婷, 主要研究方向为粮油食品加工。
E-mail: 2283543755@qq.com



邹婷婷, 硕士研究生, 主要研究方向为粮油食品加工。
E-mail: MZ120211941@stu.yzu.edu.cn



李 倩, 博士, 讲师, 主要研究方向为粮油食品加工与应用。
E-mail: liqian0101@yzu.edu.cn